锈蚀钢筋混凝土柱偏心受压性能精细化模拟

金浏, 李炎锡, 张仁波*, 杜修力

北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124

* E-mail: zhangrenbo99@126.com

收稿日期: 2021-02-09; 接受日期: 2021-03-31; 网络版发表日期: 2021-09-16

国家自然科学基金(批准号: 51822801)和国家重点研发计划(编号: 2019YFC1511003)资助项目

摘要 针对锈蚀钢筋混凝土(RC)柱的偏心受压力学行为, 本文从细观角度出发, 将混凝土看作是由骨料、砂浆基质和界面过渡区组成的三相复合材料, 并且考虑锈蚀导致的钢筋和保护层混凝土的材料性能劣化以及黏结强度退化, 建立了其三维细观精细化有限元分析模型. 数值计算结果与试验结果的良好吻合, 验证了数值分析模型的合理性. 在此基础上, 主要分析了锈蚀率和偏心率对RC柱偏压力学性能的影响. 发现: 钢筋锈蚀会引起临界偏心率增大, 使构件趋于脆性破坏; 锈蚀率增加会明显降低柱的刚度、延性和承载力; 偏心率的增加则会导致构件轴向承载力降低, 柱的破坏模式变为大偏心受压破坏. 最后, 基于完好状态RC压弯构件承载力统一公式, 考虑钢筋锈蚀的影响, 发展建立了锈蚀RC构件压弯承载力计算公式, 并与试验结果进行对比, 验证了所提公式的准确性.

关键词 钢筋混凝土柱, 偏心受压, 锈蚀, 承载力, 细观分析

1 引言

钢筋混凝土结构是目前使用最为广泛的工程结构形式之一. 在侵蚀环境下, 氯离子入侵、混凝土碳化和冻融循环作用等原因会引起钢筋锈蚀. 锈蚀不仅会引起钢筋横截面积减小、力学性能劣化^[1,2], 还会影响钢筋与混凝土间的黏结性能, 并且引起保护层开裂、混凝土力学性能劣化^[3,4]. 在诸多不利因素影响下, 锈蚀钢筋混凝土(RC)结构的承载力和延性等宏观指标下降, 从而影响其正常使用. 因而, 研究锈蚀RC构件的破坏模式和力学性能具有重要的理论意义和工程应用价值.

针对锈蚀后钢筋混凝土构件的力学行为, 国内外

研究者开展了大量的物理试验. Azad等人^[5]和Xia等人^[6]通过加速锈蚀等方法研究了钢筋锈后梁的抗弯或抗剪力学性能, 发现纵筋和箍筋的锈蚀对构件的承载力和破坏模式有较大影响. 此外, 对于钢筋混凝土板, 钢筋锈蚀后其破坏模式及抗弯或抗剪承载力同样会发生明显改变^[7,8]. 钢筋混凝土柱作为主要的竖向承重构件与抗侧力构件, 钢筋锈蚀引起RC柱力学行为的改变对工程结构的整体性能可能产生较大影响. Zhao等人^[9]对锈蚀率为5%与10%的钢筋混凝土柱进行了轴压试验, 结果表明锈蚀会导致其轴压承载力和延性退化. Lee等人^[10]研究了碳纤维增强聚合物(CFRP)包裹锈蚀率为6.7%, 7.5%和9.3%等的RC柱轴心受压性能, 指出CFRP不仅可以增加其轴向承载力, 而且可以延缓氯离

引用格式: 金浏, 李炎锡, 张仁波, 等. 锈蚀钢筋混凝土柱偏心受压性能精细化模拟. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 599–612

Jin L, Li Y X, Zhang R B, et al. Refined simulation of eccentric compression behavior of corroded reinforced concrete columns (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 599–612, doi: 10.1360/SST-2021-0060

子的侵蚀. 在RC柱偏心受压方面, El Maaddawy^[11]对锈蚀率4.25%和13.8%钢筋混凝土柱的偏心受压性能进行了研究, 认为随着锈蚀率和偏心距的增加, RC柱极限承载力降低. Xia等人^[12]研究了锈蚀程度、配箍率和偏心率对锈后钢筋混凝土柱偏压力学行为的影响.

此外, 在数值模拟方面, 杨成等人^[13]对不同箍筋锈断位置RC梁的抗剪性能进行了分析. Kallias和Imran Rafiq^[14]建立了二维非线性RC梁有限元模型, 并研究了不同位置钢筋锈蚀对RC梁弯曲性能的影响. Vu等人^[15]通过数值分析研究了锈蚀率、轴压比和配箍率等参数对锈蚀RC柱抗震性能的影响. Yuan等人^[16]采用钢筋时变本构模型, 探讨了沿海桥墩在服役期内遭受地震荷载时的破坏模式与等效塑性铰长度随时间的变化规律. Di Carlo等人^[17]扩展探讨了钢筋锈蚀率对RC柱地震荷载作用下耗能能力的影响. Cardone等人^[18]对RC空腹桥墩进行了水平往复荷载作用下的数值模拟, 研究了钢筋锈蚀部位与锈蚀率对刚度与耗能能力等抗震性能的影响. 蒋欢军和刘小娟^[19]着重讨论了纵筋锈蚀率和箍筋体积配置率等因素对钢筋混凝土柱变形性能的影响.

在试验研究和数值模拟的基础上, Yin等人^[20]采用截面分析方法建立了织物增强混凝土(TRC)加固锈蚀RC柱小偏心承载力公式. 贡金鑫等人^[21]则提出了锈蚀RC构件在水平力作用下的骨架曲线确定方法和恢复力模型. Coronelli和Gambarova^[22]提出了由于钢筋锈蚀而引起混凝土强度退化的理论公式, 得到了广泛认可^[14,15].

总体而言, 研究者对锈蚀RC构件的力学性能开展了大量的研究, 获得了较为深入的认识. 由于锈蚀RC构件大部分服役时间处于静力状态, 而构件静力力学性能是整个研究体系的基础. 目前, 关于RC构件静力性能的研究不够全面, 尤其是锈蚀RC柱偏心受压数值分析工作与定量评价仍然不够系统. 并且, 由于时间、试验条件等的限制, 目前对大锈蚀率工况研究较少; 另外, 现有研究对于锈蚀RC构件承载力的简化分析计算较为薄弱, 与定量评估不同锈蚀情况下RC构件的承载能力演化规律仍有距离.

鉴于此, 本文针对锈蚀RC柱的偏心受压性能, 考虑锈蚀引起的钢筋强度与截面积的降低、钢筋与混凝土间的黏结关系的退化以及保护层混凝土性能的劣化, 同时为了更精细的反映构件中裂纹扩展路径及损

伤演化规律等, 采用细观尺度力学分析模型来进行分析. 在模拟结果与已有试验结果良好吻合的基础上, 探讨分析了锈蚀率和偏心率对RC柱破坏模式、承载力、刚度和延性等的影响. 此外, 对完好状态RC构件压弯承载力计算公式进行修正, 发展建立锈蚀RC构件压弯承载力统一计算公式.

2 锈蚀RC柱精细化分析模型

2.1 细观数值模型的建立

在细观层面, 素混凝土可视为由砂浆基质、骨料颗粒和两者之间的界面过渡区构成的三相非均质材料. 为了较好地符合实际情况同时简化计算, 将骨料假设为球体. 骨料粒径采用二级配, 中石骨料等效粒径为30 mm, 小石骨料等效粒径为14 mm, 使用Fortran编程选用经典的“取-放”法^[23,24], 将粗骨料颗粒随机投放至砂浆基质当中(其中粗骨料颗粒所占体积分数约为35%), 并将骨料周围的外侧薄层设置为界面过渡区. 界面过渡区的实际厚度约为20~50 μm , 但考虑到计算效率的影响, 参考文献^[25], 本文将其设置为2 mm. 最终, 建立如图1所示的细观几何模型. 素混凝土各组分选取三维八节点缩减积分实体单元(C3D8R)进行离散, 钢筋则采用一维线单元离散(B31). 为提高计算精度的同时提升工作效率, 参考Jin等人^[26]关于网格敏感性的分析, 本文将各单元网格平均尺寸取为2 mm. 为反映钢筋与混凝土之间的相互作用关系, 在钢筋单元与混凝土单元之间设置非线性弹簧. 在加载过程中, 采用位移进行控制.

2.2 基本假设和本构关系

2.2.1 混凝土

一般来说, 普通混凝土构件中, 骨料颗粒强度相对较高, 加载过程中不产生大变形. 因此, 本文中的骨料颗粒单元假定为弹性体, 在荷载的作用下不发生断裂破坏. 采用塑性损伤本构^[27]来描述砂浆基质和界面过渡区的力学行为, 即假定二者在破坏时为拉伸破坏和压缩破坏, 采用各向同性的损伤变量来描述材料拉伸和压缩破坏引起的刚度退化, 其应力 σ -应变 ε 关系可表达为

$$\sigma = (1 - d)\mathbf{D}_0^{\text{el}} : (\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}) = \mathbf{D}^{\text{el}} : (\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}), \quad (1)$$

图 1 (网络版彩图) 钢筋混凝土柱三维细观数值模型示意图

Figure 1 (Color online) 3D mesoscopic numerical model of RC column.

式中, d 表示各向同性刚度退化变量, 且规定 $0 \leq d \leq 1$, 其中“0”代表没有任何损伤, “1”则代表材料完全破坏; $\mathbf{D}_0^{\text{el}}$ 表示材料初始时的弹性矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}$ 为塑性应变张量; $\mathbf{D}^{\text{el}}$ 表示损伤为 d 时的刚度矩阵。

钢筋锈蚀会产生体积较大、性能较差的锈蚀产物, 从而导致附近混凝土产生环向拉应力。随着锈蚀的进一步发展, 保护层处混凝土在达到抗拉强度时会开裂甚至剥落。这里, 采用式(2)描述保护层混凝土抗压强度的退化^[22]。对于保护层混凝土的抗拉强度, 这里参考 Hanjari 等人^[28]的工作, 认为钢筋锈蚀后混凝土抗拉强度退化与抗压强度遵循相同的规律, 即

$$\frac{f_{\text{tC}}}{f_{\text{t0}}} = \frac{f_{\text{cC}}}{f_{\text{c0}}} = \frac{1}{1 + k \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{c0}}}}, \quad (2)$$

式中, f_{c0} , f_{t0} 分别为完好混凝土的抗压和抗拉强度; f_{cC} , f_{tC} 为钢筋锈蚀后混凝土的抗压和抗拉强度; ε_{c0} 为混凝土峰值压缩应力对应的应变; k 为与钢筋类型和直径有关的系数; ε_1 是与混凝土裂缝宽度有关的开裂应变, 受锈蚀钢筋数量、锈蚀深度和锈蚀体积膨胀率等影响。

2.2.2 锈蚀钢筋模型

本文将钢筋视为均质材料, 选取双折线本构模型

描述其加载时的应力-应变关系。为了确定各部分钢筋锈蚀对柱 RC 偏压性能的影响, 本文仅研究纵筋锈蚀对锈蚀 RC 柱偏心受压力学行为的影响。钢筋锈蚀后, 假设横截面积随锈蚀率均匀减小, 且沿钢筋长度方向等量减小。为了考虑非均匀锈蚀对钢筋性能的影响, 参考 Du 等人^[1]工作引入非均匀锈蚀影响系数。钢筋锈蚀后屈服强度的退化可按式计算:

$$f_{\text{yC}} = \left(1 - \gamma \frac{A_{\text{pit}}}{A_s}\right) f_{\text{y0}}, \quad (3)$$

式中, f_{yC} 和 f_{y0} 分别是钢筋锈蚀前和锈蚀后的屈服强度; γ 是非均匀锈蚀影响系数, 根据文献^[1]的建议取值为 0.005; A_s 和 A_{pit} 分别是钢筋锈蚀前后的横截面积。

2.2.3 黏结性能退化模型

为了定义钢筋与混凝土之间非线性弹簧的行为, 需要确定弹簧的力-位移关系, 这里通过黏结区域及局部黏结-滑移关系转化获得。钢筋锈蚀膨胀导致混凝土保护层开裂及锈蚀产物较弱的力学性能, 导致钢筋与混凝土间的黏结性能下降。基于试验结果和分析, 研究者提出了不同的锈蚀钢筋黏结强度退化模型^[3,4,29]。本文模拟中, 采用 Jiang 等人^[29]提出的锈后黏结应力 τ_ρ -滑移 s 模型, 即式(4a)。与其他退化模型相比, 该模型可以分别考虑混凝土和箍筋的影响, 得到了较广泛的认可。

$$\tau_\rho = \frac{(e^{Bs} - e^{Ds})(\tau_{\text{max}})_\rho}{[e^{-B \ln[(B/D)/(B-D)]} - e^{-D \ln[(B/D)/(B-D)]}]}, \quad (4a)$$

$$(\tau_{\text{max}})_\rho = \frac{2.5 \sqrt{f_{\text{c0}}} [0.5 + 0.5 \cos(\rho^{0.514} \pi)]}{1 + 3.1 e^{-0.47[(K_{\text{co}})_\rho + 33 K_{\text{st}}]}}, \quad (4b)$$

$$(K_{\text{co}})_\rho = \frac{c_1}{D_1} \frac{1 - \rho}{1 - 27.027 \rho + 1099.275 \rho^2}, \quad (4c)$$

$$K_{\text{st}} = \frac{A_{s2}}{ns_2 D_1}, \quad (4d)$$

$$B = \frac{0.0254 + K_{\text{st}}}{-0.0232 - 8.34 K_{\text{st}}}, \quad (4e)$$

$$D = 3 \ln \left[\frac{0.7315 + (K_{\text{co}})_\rho + 33 K_{\text{st}}}{5.176 + 0.3333 [(K_{\text{co}})_\rho + 33 K_{\text{st}}]} - 0.13 \right] - 3.375, \quad (4f)$$

式中, ρ 为纵筋的锈蚀率; τ_ρ 为锈蚀率为 ρ 时的黏结应力;

f_{c0} 是混凝土的抗压强度; K_{c0} 是由混凝土保护层和钢筋确定的约束参数; c_1 代表混凝土保护层厚度; D_1 为纵筋直径; K_{st} 是由箍筋决定的约束系数; n 为纵筋的数量; A_{s2} 和 s_2 分别为箍筋的横截面面积和箍筋间距.

上述本构模型及锈蚀影响, 包括混凝土和钢筋的本构关系以及二者之间的黏结-滑移性能, 详见图2. 图中实线均为完好状态时材料的本构模型, 虚线为钢筋锈蚀后RC构件各种材料的性能.

3 模型验证

为了验证RC柱细观数值模型的准确性和合理性, 对Chotickai等人^[30]开展的锈蚀钢筋混凝土柱偏心受压性能试验进行模拟. 在他们的试验中, 探讨了几何尺寸为125 mm×125 mm×1375 mm钢筋混凝土柱偏压力学性能, 混凝土抗压强度为17.7 MPa, 每根柱选取4根屈服强度为392 MPa的12 mm钢筋作为纵筋, 采用直径为6 mm、屈服强度为235 MPa的钢筋作为箍筋, 箍筋间距为125 mm, 保护层厚度为30 mm. 试验首先对钢筋混凝土矩形柱采用了加速法, 使柱内钢筋发生锈蚀,

直至锈蚀率达到10%和20%. 接着对12根不同锈蚀程度的RC柱进行了偏心距为125 mm的偏心受压试验, 直至破坏.

表1给出了素混凝土的三种细观成分的抗压/抗压强度、泊松比和弹性模量等力学参数. 纵筋和箍筋的屈服强度和直径等信息如表2所示. 其中, 骨料颗粒及砂浆基质的强度与弹性模量等力学性质采用Chotickai等^[30]试验实测数据; 界面过渡区的参数不易测得, 采用反复试算法来确定, 也即是对标准立方体混凝土试块(边长为150 mm)开展了多次单轴轴心受压试验来确定其力学参数. 在进行反复试算后, 发现混凝土选取表1中的力学参数时单轴轴心抗压强度模拟值是18.1 MPa, 与试验测得强度17.7 MPa比较吻合, 可认为参数选取比较合理.

图3为模拟得出的荷载-位移曲线与Chotickai等人^[30]的试验结果之间的对比, 在偏心承载力、初始刚度和最终位移等方面, 有限元分析结果与试验得到的锈蚀钢筋混凝土柱的整体性能比较一致. 图4给出了模拟所得的失效模式和试验结果的比较, 可以看到, 模拟结果与试验结果吻合较好, 均表现为受拉侧混凝土

图2 (网络版彩图)模型假设和材料的本构模型

Figure 2 (Color online) Model hypothesis and constitutive model of materials.

表 1 混凝土细观组分的主要力学参数**Table 1** Mechanical parameters of the three meso components of concrete

	弹性模量 (GPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
骨料	70	0.20		
砂浆基质	33.50	0.20	19.23	1.67
界面过渡区	31.50	0.20	14.35	1.42

表 2 钢筋力学参数**Table 2** Mechanical parameters of reinforcing bars

	弹性模量 (GPa)	直径	屈服强度 (MPa)	极限强度 (MPa)
纵筋	200	12	392	535
箍筋	210	6	235	415

土出现了多道横向裂缝,同时纵筋屈服,呈现出较为典型的大偏心受压破坏.因此,可以认为数值模拟结果在RC柱破坏模式以及偏压承载力等方面均与试验结果吻合较好,从而说明了细观分析模型的合理性和准确性.

4 模拟结果分析与讨论

基于上述细观数值模型,对偏心率 e/h_0 范围为0~0.6和锈蚀率 ρ 范围为0~25%的钢筋混凝土柱的偏心受压行为进行模拟.不同锈蚀率($\rho=0, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%$ 和 25%)下偏心率 e/h_0 为0.6和0.2的钢筋混凝土柱的偏心受压破坏模式如图5所示.图6和7为相应的荷载-位移曲线、承载力、刚度和位移延性等指标的变化.图8代表性地给出了锈蚀率 $\rho=5\%$ 和 $\rho=25\%$ 时RC柱混凝土沿截面高度的应变分布图,其中 P_u 表示峰值荷载.

4.1 锈蚀率的影响

由图5可知,当未锈蚀的RC柱承受偏心率为0.6的偏压荷载时,柱的破坏模式为典型的受拉破坏,即随着荷载的增加,首先在受拉区混凝土产生横向裂缝,随后受拉区钢筋达到屈服强度,最后受压区混凝土达到其极限压应变,RC柱破坏,属于延性破坏;随着锈蚀率增加,受拉侧的裂缝宽度明显变宽,且受压区破坏

图 3 (网络版彩图) 模拟结果与试验对比**Figure 3** (Color online) Comparison of the simulation results and experimental ones. **图 4** (网络版彩图)模拟与试验破坏模式对比**Figure 4** (Color online) Comparison of simulated and experimental failure modes.

更为严重.由图6知 $e/h_0=0.6$ 时RC柱荷载-位移曲线形状相似,但随着锈蚀率增加,极限位移和承载力减小.相对而言,承载力随锈蚀率增加降低更加明显,其下降幅度随着锈蚀率的增加趋于平缓,当锈蚀率为25%偏心率0.6时,大偏心承载力下降了大约47%(图7).从图7还可以看出,随着锈蚀率的增加,RC柱的刚度和延性都有明显的下降,这与其他研究者^[31]的结论相似.造成这些现象的主要原因是,随着锈蚀率的增加,受拉纵筋的屈服强度下降,并且纵筋与混凝土间的黏结强度出现了严重的退化.

图5 (网络版彩图)不同锈蚀率下钢筋混凝土柱偏心受压破坏模式和钢筋应力

Figure 5 (Color online) Failure modes of RC columns under eccentric compression with different corrosion levels and rebar stress.

图6 (网络版彩图)不同锈蚀率下钢筋混凝土柱偏心受压荷载-位移曲线

Figure 6 (Color online) Load displacement curves of RC columns under eccentric compression with different corrosion levels.

从图8中可以看出当锈蚀率较低($\rho=5\%$)时,大偏心RC柱的混凝土应变分布基本符合平截面假定。当锈蚀率较大($\rho=25\%$)时,混凝土的应变则不符合平截面假定,这与其他学者的研究结果类似^[31]。这是因为当锈蚀率较小时,钢筋与混凝土间的黏结强度变化较小,尚能基本保障混凝土与钢筋的变形协调,二者可以较好地共同受力;而当锈蚀率较大时,钢筋与混凝土间的黏结应力退化明显,混凝土与钢筋产生相对滑移,

使得截面上的应变分布发生变化,因而不符合平截面假定。

当偏心率较小时,从图5可知,靠近偏心力一侧的受压区混凝土达到极限压应变被压坏,同侧的受压钢筋也达到抗压屈服强度,为小偏心受压破坏。随着锈蚀率增加,受压区的混凝土破坏更为严重。图7给出了小偏心RC柱锈蚀率与轴向承载力的关系图,可以看出当锈蚀率为10%左右时承载力退化较快,这与大偏压

图 7 (网络版彩图) 锈蚀率对偏心受压 RC 柱承载力、初始刚度及延性系数的影响. (a) $e/h_0=0.6$; (b) $e/h_0=0.2$

Figure 7 (Color online) Effect of corrosion level on bearing capacity, initial stiffness and ductility coefficient of eccentrically loaded RC columns. (a) $e/h_0=0.6$; (b) $e/h_0=0.2$.

情形略有差别; 随着锈蚀率的增加, 承载力退化速率变缓. 同时, 由图 7 还可知, 锈蚀率对小偏心受压柱刚度和延性的影响与对承载力影响相似.

锈蚀 RC 柱在小偏心承载时混凝土沿截面高度的应变分布如图 8 所示. 从图中可以看出, 当偏心率较小 (如 $e/h_0=0.2$) 时, 混凝土应变仍然基本符合平截面假定. 这可能是因为当偏心率较小时, 混凝土截面大部分仍然受压, 还能较好地与纵筋共同作用. 综合来看当偏心距相同时, 随着锈蚀率的增加, 锈蚀 RC 柱峰值荷载时混凝土的应变减小, 从而使得 RC 柱宏观延性下降. 从图中可以看出, 锈蚀率较大的 RC 柱承受偏心荷载时, 受压区混凝土区域较小. 因此, 钢筋锈蚀会引起混凝土相对受压区高度的降低. 并且, 从图 8 可知, 当偏心率较小时, RC 柱峰值荷载时混凝土的压应变明显大于偏心率较大的 RC 柱.

4.2 偏心率的影响

如图 9(a) 所示, 当偏心率 ($e/h_0=0.1$) 较小时, 锈蚀 RC

柱仅在混凝土受压区边缘突然发生压碎, 属于受压破坏形态; 当偏心率 ($e/h_0=0.8$) 较大时, 锈蚀 RC 柱在加载过程中, 首先在受拉区产生横向裂缝, 最后受压区边缘混凝土达到极限压应变被压碎, 属于受拉破坏形态. 在两种破坏形态之间存在着一种平衡破坏形态, 即介于大偏心和小偏心间的临界偏心: 当锈蚀率 $\rho=10\%$ 、偏心率为 $e/h_0=0.3$ 时, 在锈蚀 RC 柱受拉区钢筋达到屈服强度的同时, 处于受压区边缘的混凝土被压碎, 此种破坏也属于受拉破坏形态; 当锈蚀率为 $\rho=25\%$ 时, 平衡破坏点转变为偏心率为 $e/h_0=0.4$ 左右, 如图 9(b) 所示. 换言之, 当锈蚀率增大时, 大小偏心受压之间的临界偏心率提高, 可能使锈蚀前为平衡破坏的 RC 柱转变为小偏心脆性受压破坏, 使结构趋于不安全. 发生此现象的原因为随着锈蚀率的增加, 混凝土受压区相对高度下降, 进而引起平衡破坏点的偏心率提高, 在其他学者的研究中也有类似的结果^[31,32].

图 10 给出了锈蚀率 $\rho=10\%$ 和 $\rho=25\%$ 时不同偏心率对荷载-位移曲线的影响. 从图中可以看出随着偏心率

图 8 (网络版彩图)混凝土沿截面高度的应变分布
Figure 8 (Color online) Strain distribution of concrete along section height.

图 9 (网络版彩图)偏心率对钢筋混凝土柱破坏模式的影响. (a) $\rho=10\%$; (b) $\rho=25\%$
Figure 9 (Color online) Influence of eccentricity on failure mode of RC columns. (a) $\rho=10\%$; (b) $\rho=25\%$.

的增加, 荷载-位移曲线变得越来越平缓. 随着偏心率的增加, 锈蚀RC柱的承载力明显下降, 位移增大, 并且

试件的初始刚度变小, 而延性增强, 使试件的破坏模式从脆性破坏转变为延性破坏.

图 10 (网络版彩图)不同偏心率下钢筋混凝土柱偏心受压荷载-位移曲线. (a) $\rho=10\%$; (b) $\rho=25\%$

Figure 10 (Color online) Load displacement curves of RC columns under eccentric compression with different eccentricities. (a) $\rho=10\%$; (b) $\rho=25\%$.

5 锈蚀RC偏压构件承载力计算

5.1 M - N 相互作用曲线

本文模拟所得的锈蚀钢筋混凝土柱的 N/N_u - M/M_u 相互作用, 如图11所示, 其中 N_u 和 M_u 分别为未锈蚀柱的轴向承载力和抗弯承载力. 从图中可以看出, 锈蚀会引起RC构件的偏心承载力显著降低. 当锈蚀率为10%时, RC柱轴压承载力比纯弯承载力退化剧烈. 对模拟结果进行拟合可以看到, N/N_u - M/M_u 相互作用关系大致符合二次多项式曲线, 这与黄靓等人^[33]对未锈蚀RC柱的建议相似. 实际上, 由图可以看到, 钢筋锈蚀后, RC柱的 N/N_u - M/M_u 曲线形状与《混凝土结构设

计规范》(GB 50010-2010)^[34]对完好状态RC柱的建议同样比较相似, 但是对于对称布置钢筋截面, 规范给出的承载力计算方法涉及大小偏心的判断^[33], 过程比较复杂. 因而, 这里认为锈蚀钢筋混凝土柱的 N/N_u - M/M_u 曲线为二次多项式, 取锈蚀钢筋混凝土柱轴心受压、纯弯曲和平衡破坏三个特定受力状态, 将其相对应的承载力作为曲线的三个特征点. 在此基础上采用截面分析法, 考虑钢筋锈蚀引起的材性退化, 修正完好状态RC柱承载力的计算公式, 获得钢筋锈蚀的轴压、纯弯及衡破坏(曲线顶点)承载力, 建立锈蚀RC柱轴压-偏压-纯弯统一承载力计算公式.

5.2 锈蚀RC柱轴压承载力公式

如图12所示, 锈蚀钢筋混凝土柱轴向受压时, 可将横截面分解成三个单独受力的部分, 相应的承载力计算公式为

$$N_0 = f_{cc}A_{c1} + f_{cc}A_{c2} + \alpha A_{s1}f_{yc}, \quad (5a)$$

$$A_{c1} = (2bc + 2hc) - 4c_1^2, \quad (5b)$$

$$A_{c2} = bh - [(2bc + 2hc) - 4c_1^2], \quad (5c)$$

式中, A_{c1} 为保护层混凝土面积; A_{c2} 核心区约束混凝土面积; A_{s1} 为考虑屈曲的纵筋面积; f_{cc} 为锈后保护层混凝土的抗压强度; f_{cc} 为核心区约束混凝土的抗压强度(式(6)); α 是考虑屈曲的纵筋屈服强度折减系数, 定义为临界屈曲应力 f_{cr} (式(8))与锈后纵筋的屈服强度 f_{yc} 的比值, 且 $\alpha \leq 1$.

图 11 (网络版彩图)钢筋混凝土柱的模拟计算值 N/N_u - M/M_u 相互作用图

Figure 11 (Color online) Simulated and calculated values N/N_u - M/M_u interaction diagram for the RC columns.

图 12 (网络版彩图) 锈蚀RC柱轴心受压承载力模型图
Figure 12 (Color online) Bearing capacity model of corroded RC column under axial compression.

根据钱稼茹等人^[35], 核心区约束混凝土强度为

$$f_{cc} = (1 + 1.79\lambda_v)f_{c0}, \quad (6)$$

式中, f_{c0} 为混凝土抗压强度; λ_v 为配箍特征值, 考虑箍筋锈蚀时可由式(7a)估算得出.

$$\lambda_v = \rho_{2C} \frac{f_{2yC}}{f_{c0}}, \quad (7a)$$

$$\rho_{2C} = \frac{A_{s2C}L_2}{s_2A_{c2}}, \quad (7b)$$

式中, ρ_{2C} 为锈后箍筋体积配箍率; f_{2yC} 为箍筋锈后屈服强度可由式(3)计算得出; A_{s2C} 为锈后箍筋的横截面积; L_2 为柱横截面中箍筋长度; s_2 为纵向箍筋间距.

锈后RC柱承受轴向荷载时, 纵筋可以提供一定的承载力, 但混凝土保护层的开裂或剥落增加了纵筋受压时屈曲的概率. 本文认为纵筋受压时最大的受压承载力为锈后屈服强度与临界应力的较小值. 根据欧拉公式, 临界屈曲应力 f_{cr} 可由下式计算得出

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E_s I_s}{(\mu L_{exp})^2 A_s}, \quad (8)$$

式中, E_s 为锈后钢筋的弹性模量; I_s 为钢筋锈后的惯性矩; L_{exp} 是混凝土保护层剥落后锈蚀钢筋的外露长度, 由环境和混凝土等共同决定, 根据学者Tapan和Abou-taha^[36]的研究, 可假定 $L_{exp}=20D_1$, D_1 为纵筋直径; μ 为长度系数, 由压杆的约束条件决定, 根据实际的加载状况 μ 可取为1; A_s 为纵筋的截面积.

5.3 锈蚀RC柱纯弯曲承载力公式

图13为钢筋混凝土构件纯弯曲截面的应力应变分布图. 根据力的平衡方程, 混凝土受压区的等高度 x 可由下列公式计算:

$$x = \frac{(\beta - \alpha)A_{s1C}f_{yC}}{\alpha f_{cc}b}, \quad (9)$$

式中, α 为考虑屈曲的纵筋屈服强度折减系数; β 为黏结强度折减系数, 定义为锈蚀与未锈蚀钢筋与混凝土间的黏结强度之比, 二者可分别由式(4b)及《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[34]确定; A_{s1C} 为锈蚀纵筋截面面积; α_1 是受压区混凝土矩形应力图的应力值和混凝土轴心抗压强度的比值, 当混凝土强度等级为C80时 α_1 取0.94, 当混凝土强度等级不大于C50时 α_1 取1.0, 其间采用直线内插法获得.

对受拉钢筋合力点取矩, 得到钢筋锈蚀后纯弯曲截面的弯矩:

$$M_0 = \alpha f_{cc}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha f_{yC}A_{s1C}(h_0 - a_s'), \quad (10)$$

式中, a_s' 表示表示受压钢筋合力点与截面压缩边之间的距离, 可根据下式计算得出:

$$a_s' = c_1 + D_2 + \frac{D_1}{2}, \quad (11)$$

式中, c_1 为保护层厚度; D_1 和 D_2 为别为纵筋与箍筋的直径.

截面为钢筋对称布置的混凝土构件, 当承受极限弯矩时, 受压钢筋不会屈服, 此时受压钢筋应力无法确定, 可对受压钢筋取矩, 正截面受弯承载力为

$$M_0 = \beta A_{s1C}f_{yC}(h_0 - a_s'). \quad (12)$$

图 13 (网络版彩图) 纯弯曲截面应力应变分布图
Figure 13 (Color online) Stress strain distribution of pure bending section.

5.4 锈蚀RC柱平衡破坏承载力公式

对于钢筋混凝土偏心受压构件, 当受拉区钢筋与受压区混凝土同时达到极限强度时, 此时被称为偏压构件的平衡破坏点. 同时, 平衡破坏点也是受压构件大小偏心破坏的分界点. 此时偏心受压构件达到其能承受的最大弯矩, 在 $M-N$ 曲线中为峰值弯矩点. 对于偏心受压的锈蚀RC柱, 只有确定了混凝土相对受压区高度才能准确求出平衡破坏时所对应的轴力和弯矩. 张克波等人^[37]提出了锈蚀RC偏压构件界限受压区高度计算模型, 其表达式为

$$x_c = \xi_{bc} h_0 = \frac{\beta_1}{1 + \frac{\Phi(\rho)f_{yc}}{E_s \varepsilon_{cu}}} h_0, \quad (13)$$

$$\Phi(\rho) = \Phi_1 \rho + \Phi_2, \quad (14)$$

式中, x_c 为平衡破坏时混凝土相对受压区高度; h_0 为混凝土截面有效高度; $\Phi(\rho)$ 为钢筋与混凝土应变不协调系数, 由锈蚀率 ρ 决定, 根据张克波等人^[37]研究的建议, 本文中 Φ_1 和 Φ_2 分别取值为 0.27152 和 1; ε_{cu} 为混凝土极限应变, 在本文中取 0.0033; β_1 是矩形应力图受压区高度与中和轴高度的比值, 当混凝土强度等级为 C80 时 β_1 取 0.74, 当混凝土强度等级不大于 C50 时 β_1 取 0.8, 其间采用直线内插法获得.

因此, 锈蚀RC柱偏心受压时平衡破坏点的轴力和弯矩可通过下列公式求得:

$$N_B = \alpha f_{cc} b x_c + (\alpha - \beta) A_{s1c} f_{yc}, \quad (15)$$

$$M_B = \alpha f_{cc} b x_c \left(h_0 - \frac{x_c}{2} \right) + \alpha f_{yc} A_{s1c} (h_0 - a_s'). \quad (16)$$

5.5 锈蚀RC柱偏压承载力公式及验证

将上面获得的锈蚀RC柱轴心受压、纯弯曲和平衡破坏点极限承载力代入 $N/N_u-M/M_u$ 二次函数表达式, 得到

$$\begin{cases} A \left(\frac{M}{M_0} \right) + B \left(\frac{N}{N_0} - C \right)^2 = 1, \\ A = -\frac{4k}{(k-1)^2}, B = \frac{4k^2}{(k-1)^2}, C = \frac{k+1}{2k}, \\ k = \frac{n+m-1}{n^2-n}, n = \frac{N_B}{N_0}, m = \frac{M_B}{M_0}, \end{cases} \quad (17)$$

式中, M_0 为锈后RC构件正截面纯弯承载力, 按式(10)

计算, 其中对称配筋时可按式(12)计算; N_0 为锈蚀RC柱轴心受压承载力, 根据式(5a)计算; N_B 和 M_B 分别为锈蚀RC构件偏心受压时的平衡破坏点的轴压极限承载力和纯弯极限承载力, 分别由式(15)和(16)得出.

式(17)为锈蚀RC柱压弯承载力统一公式, 是以二次多项式为基础的 $M-N$ 相互作用模型, 建立了从轴心受压到纯弯曲中间为偏压连续过度的统一计算模型, 使三种受力状态的承载力公式建立了合理的联系, 其有比较清晰的物理含义. 特别是在计算对称布置钢筋截面的RC构件的承载力时, 可省去大小偏心受压的判别, 减少计算量, 从而便于实际工程的应用.

为了进一步验证锈蚀RC压弯构件承载力统一公式的准确性, 表3给出了统一公式与现有文献中试验结果的对比, 其中涵盖了不同截面尺寸、偏心距、混凝土强度和锈蚀率等关键因素. 表3中构件承载力试验值与文献数据比值的平均值为 1.045, 方差为 0.011, 证明了本文锈蚀RC压弯构件承载力统一公式的准确性.

6 结论

本文考虑钢筋锈蚀引起的材性退化及混凝土材料的细观非均质性, 建立了三维细观数值分析模型, 模拟分析了锈蚀RC柱的偏心受压力学行为, 分析了锈蚀率和偏心率的影响规律. 进而, 修正完好状态计算公式, 发展提出了锈蚀RC构件压弯承载力统一公式. 主要结论如下.

(1) 锈蚀对承受大小偏心受压的RC柱轴向承载力均有较大影响, 当锈蚀率为 25% 时, 偏心率较大 ($e/h_0=0.6$) 的RC柱承载力退化大约 47%, 而小偏心率 ($e/h_0=0.2$) RC柱承载力下降大约 30%, 表明钢筋锈蚀对RC柱大偏压承载力影响更大.

(2) 锈蚀对RC压弯构架的初始刚度与延性有较大影响, 随着锈蚀率的增加, 初始刚度与延性下降速率减缓.

(3) 锈蚀率增大, 锈蚀RC柱的相对受压区高度下降, 本文中锈蚀率由 10% 增大至 25% 时, 临界偏心率由 0.3 增大到 0.4, 可能使破坏模式转变为小偏心受压破坏, 使结构趋于不安全.

(4) 提出了锈蚀RC偏心受压构件压弯承载力统一公式, 可为锈后构件的承载力评估及加固设计等提供

表 3 统一公式与文献数据的对比

Table 3 Comparison of unified formula and literature data

试件编号	数据来源	截面尺寸 (mm)	偏心距 (mm)	混凝土强度 (MPa)	纵筋屈服 强度 (MPa)	锈蚀率 (%)	配筋面积 (mm ²)	承载力试验 值 (kN)	承载力理论 值 (kN)	误差 (%)
C-5	文献[9]	150×150	0	36.7	349	7.72	452	564	610	6.56
C-10			0	36.7	349	16.98	452	247	263	6.45
NUW-e1	文献[11]	125×125	37.50	28.5	550	0	314	215	199	7.44
NUW-e4			107.50	28.5	550	0	314	92	100	8.70
CUW-e2/30			53.75	28.5	550	4.25	314	167	176	5.39
CUW-e4/30			107.50	28.5	550	4.25	314	91	95	4.40
CUW-e1/90			37.50	28.5	550	13.8	314	149	153	2.68
CUW-e3/90			71.25	28.5	550	13.8	314	116	110	5.17
Z1	文献[31]	250×350	40.00	47.5	335	0	1526	3530	3789	7.34
Z3			150.00	43.3	335	0	1526	1420	1351	4.86
Z4			40.00	47.8	335	0.98	1526	3020	3153	4.40
Z6			150.00	53.7	335	1.34	1526	1310	1269	3.13
Z7			40.00	42.5	335	3.51	1526	2940	2702	8.10
IV-50%-110	文献[36]	610×610	110.00	27.6	414	50.00	7385	3898	3547	9.01
IV-50%-300			300.00	27.6	414	50.00	7385	1408	1296	7.95

参考.

需要指出的是, 本文仅探讨纵筋锈蚀对锈蚀RC柱偏心受压力学行为的影响, 但实际工程中往往是纵筋与箍筋共同锈蚀, 而关于箍筋锈蚀和箍筋与纵筋同时

锈蚀等因素对柱偏压性能的影响将在后续工作中展开. 此外, 本文选取了多个文献的建议或取值, 其推导或拟合过程基本基于较低钢筋锈蚀率工况, 对于是否适用于较高锈蚀率的构件还有待进一步研究与探讨.

参考文献

1 Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Mag Concrete Res*, 2005, 57: 135–147

2 Zhang W, Gu X, Jin X, et al. Study on corrosion mechanism of steel bars in concrete and mechanical performance of corroded steel bars (in Chinese). *J Build Struct*, 2010, 31(S1): 327–332 [张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀钢筋力学性能研究. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 327–332]

3 Feng Q, Visintin P, Oehlers D J. Deterioration of bond-slip due to corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete. *Mag Concrete Res*, 2016, 68: 768–781

4 Yuan Y, Jia F, Cai Y. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams (in Chinese). *Chin Civ Eng J*, 2001, 34: 47–52,96 [袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型. 土木工程学报, 2001, 34: 47–52,96]

5 Azad A K, Ahmad S, Al-Gohi B H A. Flexural strength of corroded reinforced concrete beams. *Mag Concrete Res*, 2010, 62: 405–414

6 Xia J, Jin W, Li L. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment. *Corrosion Sci*, 2011, 53: 1794–1805

7 Ye Z, Zhang W, Gu X. Deterioration of shear behavior of corroded reinforced concrete beams. *Eng Struct*, 2018, 168: 708–720

8 Chung L, Najm H, Balaguru P. Flexural behavior of concrete slabs with corroded bars. *Cement Concrete Compos*, 2008, 30: 184–193

9 Zhao Y, Zhang D, Shen S, et al. Axial loading capacity of concrete-jacketed RC columns with pre- and post-corrosion damage. *Struct Concrete*, 2016, 17: 355–364

10 Lee C, Bonacci J F, Thomas M D, et al. Accelerated corrosion and repair of reinforced concrete columns using carbon fibre reinforced polymer sheets. *Can J Civ Eng*, 2000, 27: 941–948

- 11 El Maaddawy T. Post-repair performance of eccentrically loaded RC columns wrapped with CFRP composites. *Cement Concrete Compos*, 2008, 30: 822–830
- 12 Xia J, Jin W L, Li L Y. Performance of corroded reinforced concrete columns under the action of eccentric loads. *J Mater Civ Eng*, 2016, 28: 04015087
- 13 Yang C, Xue X, Zhang H, et al. Shear behavior of RC beams with spatial distribution of corrosion-induced fractured stirrups by finite element analysis (in Chinese). *J Build Struct*, 2018, 39: 146–153 [杨成, 薛昕, 张瀚引, 等. 箍筋弯曲端部锈断分布对钢筋混凝土梁受剪性能影响的模拟研究. *建筑结构学报*, 2018, 39: 146–153]
- 14 Kallias A N, Imran Rafiq M. Finite element investigation of the structural response of corroded RC beams. *Eng Struct*, 2010, 32: 2984–2994
- 15 Vu N S, Yu B, Li B. Prediction of strength and drift capacity of corroded reinforced concrete columns. *Constr Build Mater*, 2016, 115: 304–318
- 16 Yuan W, Guo A, Li H. Seismic failure mode of coastal bridge piers considering the effects of corrosion-induced damage. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2017, 93: 135–146
- 17 Di Carlo F, Meda A, Rinaldi Z. Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns. *Eng Struct*, 2017, 153: 264–278
- 18 Cardone D, Perrone G, Sofia S. Experimental and numerical studies on the cyclic behavior of R/C hollow bridge piers with corroded rebars. *Earthquakes Struct*, 2013, 4: 41–62
- 19 Jiang H, Liu X. Study on deformation-based performance index of corroded reinforced concrete column (in Chinese). *J Build Struct*, 2015, 36: 115–123 [蒋欢军, 刘小娟. 锈蚀钢筋混凝土柱基于变形的性能指标研究. *建筑结构学报*, 2015, 36: 115–123]
- 20 Yin S, Hu X, Hua Y. Study on the compression performance of small eccentric degradation columns strengthened with TRC in a chloride environment. *Constr Build Mater*, 2018, 176: 50–59
- 21 Gong J, Li J, Zhao G. Restoring force model of corroded reinforced concrete elements (in Chinese). *Chin Civ Eng J*, 2005, 38: 38–44, 101 [黄金鑫, 李金波, 赵国藩. 受腐蚀钢筋混凝土构件的恢复力模型. *土木工程学报*, 2005, 38: 38–44, 101]
- 22 Coronelli D, Gambarova P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines. *J Struct Eng*, 2004, 130: 1214–1224
- 23 Wriggers P, Mofteh S O. Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. *Finite Elem Anal Des*, 2006, 42: 623–636
- 24 Šavija B, Luković M, Pacheco J, et al. Cracking of the concrete cover due to reinforcement corrosion: A two-dimensional lattice model study. *Constr Build Mater*, 2013, 44: 626–638
- 25 Donza H, Cabrera O, Irassar E F. High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement Concrete Res*, 2002, 32: 1755–1761
- 26 Jin L, Xia H, Jiang X, et al. Size effect on shear failure of CFRP-strengthened concrete beams without web reinforcement: Meso-scale simulation and formulation. *Composite Struct*, 2020, 236: 111895
- 27 Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *J Eng Mech*, 1998, 124: 892–900
- 28 Hanjari KZ, Kettli P, Lundgren K. Analysis of mechanical behavior of corroded reinforced concrete structures. *ACI Struct J*, 2011, 108(5): 532–541
- 29 Jiang C, Wu Y F, Dai M J. Degradation of steel-to-concrete bond due to corrosion. *Constr Build Mater*, 2018, 158: 1073–1080
- 30 Chotickai P, Tongya P, Jantharaksa S. Performance of corroded rectangular RC columns strengthened with CFRP composite under eccentric loading. *Constr Build Mater*, 2021, 268: 121134
- 31 Yi W, Lei G. Experimental research on the bearing capacity of corroded reinforced concrete columns (in Chinese). *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2008, 35: 6–10 [易伟建, 雷国强. 锈蚀钢筋混凝土偏心受压柱承载力试验研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2008, 35: 6–10]
- 32 Xin J, Zhou J, Zhou F, et al. Bearing capacity model of corroded RC eccentric compression columns based on Hermite interpolation and Fourier fitting. *Appl Sci*, 2018, 9: 24
- 33 Huang L, Lu Y, Xu Z. Correctional recommendation of bearing capacity formula of RC eccentric compression members (in Chinese). *Eng Mech*, 2012, 29: 169–175 [黄靛, 鲁懿虬, 徐紫鹏. 对钢筋混凝土偏压构件承载力计算公式的修正建议. *工程力学*, 2012, 29: 169–175]
- 34 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures (in Chinese). GB50010-2010 (2015 Ed). Beijing: China Architecture and Building Press, 2015 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范. GB50010-2010 (2015年版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2015]
- 35 Qian J, Cheng L, Zhou D. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2002, 42: 1369–1373 [钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42: 1369–1373]

- 36 Tapan M, Aboutaha R S. Strength evaluation of deteriorated RC bridge columns. *J Bridge Eng*, 2008, 13: 226–236
- 37 Zhang K, Hu J, Zhang J, et al. On the experiment and bearing capacity calculation of eccentrically compressed component made of corroded reinforced concrete (in Chinese). *J Exper Mech*, 2010, 25: 625–632 [张克波, 胡俊, 张建仁, 等. 锈蚀钢筋混凝土偏心受压构件实验及其承载力计算方法研究. *实验力学*, 2010, 25: 625–632]

Refined simulation of eccentric compression behavior of corroded reinforced concrete columns

JIN Liu, LI YanXi, ZHANG RenBo & DU XiuLi

The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

In this paper, concrete is considered a three-phase composite material composed of aggregate, a mortar matrix, and an interface transition zone to investigate the eccentric compressive behavior of corroded reinforced concrete (RC) columns from the mesoscopic perspective. The deterioration of the material properties of steel bars, concrete cover, and bond strength was considered to be caused by corrosion, and a three-dimensional refined finite element analysis model was established. The numerical results are in good agreement with the experimental results, which verifies the rationality of the numerical analysis model. The effect of corrosion level and eccentric ratio on the eccentric performance of corroded RC columns is explored and discussed. The simulation results indicate that the corrosion of steel bars increases the critical eccentricity, which may make the structure tend to brittle failure. The increased corrosion level would obviously cause a reduction of stiffness, ductility, and ultimate bearing capacity of the columns. In addition, increased eccentricity causes a reduction in axial bearing capacity, and the failure mode of columns changes to large eccentric compression failure. Eventually, based on the unified formula for the bearing capacity of RC members in good condition and in consideration of the influence of steel corrosion, a calculation formula for the bearing capacity of corroded RC members was developed. The accuracy of the proposed formula was verified in comparison with the experiment results.

reinforced concrete column, eccentric compression, reinforcement corrosion, bearing capacity calculation, mesoscale

doi: [10.1360/SST-2021-0060](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0060)